

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	2
1.2 LUGAR DE APLICACIÓN.....	2
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.5 ÁREA DE ESTUDIO.....	3
1.6 OTROS INTERESADOS.....	4
1.7 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.8 OBJETIVOS.....	4
1.8.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.9 ALCANCES Y RESTRICCIONES	5
1.10 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	5
1.11 RESULTADOS ESPERADOS	8
1.12 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	8
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE DEL DOMINIO DEL PROBLEMA.....	10
2.1 EL PELLETT COMO FUENTE DE ENERGÍA	11
2.1.1 Dimensionamiento de los pellets.....	11
2.1.2 Características principales de los pellets	12
2.1.3 Poder calorífico del pellet	12
2.2 NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELLETT.....	17
2.3 PRINCIPALES NORMAS DE PELLETT.....	18
2.3.1 Austria	18
2.3.2 Suecia	19
2.3.3 Alemania.....	20
2.3.4 Italia	22
2.3.5 Normativa europea	23
2.3.6 DIN serie 51.900.....	26
2.3.7 ISO 17.225-2.....	27
2.3.8 Chile	29

2.4	CRITERIOS DE CALIDAD DE LOS PELLETS	30
2.5	ÍNDICES DE CALIDAD DE LOS PELLETS	31
2.6	MERCADO DEL PELLET DE ASERRÍN DE MADERA	33
2.6.1	A nivel mundial.....	33
2.6.2	En Chile	36
2.7	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PELLETIZADO A GRAN ESCALA	39
2.8	VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PELLETIZADO.....	41
2.8.1	Presión	41
2.8.2	Temperatura	42
2.8.3	Contenido de humedad	42
2.8.4	Aglomeración	42
2.8.5	Adición de vapor.....	45
2.8.6	Tipo de aserrín.....	45
2.8.7	Diámetro del orificio de la matriz	46
2.8.8	Cantidad de áridos y cenizas	46
2.9	MAQUINARIA EN LA PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	47
2.9.1	Tipos de pelletizadoras.....	47
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO UTILIZADO.....		56
3.1	DISEÑO CONCEPTUAL	57
3.1.1	Esquema del proceso	57
3.1.2	Esquema conceptual de la máquina pelletizadora convencional	58
3.1.3	Esquema conceptual de la máquina pelletizadora hidráulica	69
CAPÍTULO 4. DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MÁQUINA PELLETIZADORA CONVENCIONAL		73
4.1	DISEÑO MECÁNICO PELLETIZADORA CONVENCIONAL	74
4.1.1	Sistema de compactación	74
4.1.2	Sistema de corte	93
4.1.3	Sistema de transmisión.....	96
4.1.4	Sistema de potencia	149
4.1.5	Sistema de alimentación.....	158
CAPÍTULO 5. DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MÁQUINA PELLETIZADORA HIDRÁULICA		164
5.1	DISEÑO MECÁNICO PELLETIZADORA HIDRÁULICA.....	165

5.1.1	Circuito oleohidráulico	165
5.1.2	Sistema de transmisión.....	166
5.1.3	Sistema de potencia	177
5.1.4	Componentes secundarios del sistema hidráulico	177
CAPÍTULO 6.	ESTUDIO ECONÓMICO	190
6.1	ESTUDIO TÉCNICO.....	191
6.1.1	Tamaño.....	191
6.1.2	Localización.....	191
6.2	ANÁLISIS DE COSTOS.....	192
6.2.1	Costo total máquina pelletizadora convencional	193
6.2.2	Costo total máquina pelletizadora hidráulica.....	193
6.2.3	CAO	193
6.2.4	CAM.....	197
6.2.5	CAUE.....	200
CAPÍTULO 7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	202
7.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	203
7.1.1	Eficiencia mecánica de ambos equipos	203
7.1.2	Comparación de costos por componentes	205
7.1.3	Comparación de costos operacionales	207
7.1.4	Comparación de costos de mantenimiento.....	208
7.1.5	Comparación de alternativas por CAUE	209
7.2	JUSTIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA ESCOGIDA	209
7.3	MODELO 3D DE ALTERNATIVA ESCOGIDA	210
CONCLUSIONES.....		213
REFERENCIAS		215
ANEXOS		225

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dimensiones de un pellet estándar. Fuente: ARPI TRUJILLO - CALDERÓN TORAL, 2010.....	12
Figura 2: Norma CEN/TS 14.961. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.....	24
Figura 3: Norma EN 14.961-2. Fuente: www.concereal.es, 2011.....	26
Figura 4: Fases proyecto de ley de regulación de los biocombustibles sólidos. Fuente: Irarrázabal S., 2018.....	30
Figura 5: Mapa del pellet mundial y flujos de comercio. Fuente: Gauthier, 2019.....	34
Figura 6: Diagrama del proceso de pelletizado. Fuente: PACHECO QUEZADA, 1999.	41
Figura 7: Placa de granulación (A), Tambor de pelletización (B), Tambor de mezcla (C) y Lecho fluidizado (D). Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 8: Pelletizadora móvil. Fuente: GEMCO ENERGY, 2020.....	48
Figura 9: Pelletizadora de madera. Fuente: spanish.alibaba.com, 2020.....	49
Figura 10: Pelletizadora diésel. Fuente: es.made-in-china.com, 2020.	50
Figura 11: Pelletizadora de matriz anular. Fuente: GEMCO ENERGY, 2020.	51
Figura 12: Pelletizadora de matriz plana. Fuente: GEMCO ENERGY, 2020.	52
Figura 13: Pelletizadora con rodillos giratorios. Fuente: GEMCO ENERGY, 2020.....	53
Figura 14: Pelletizadora eléctrica. Fuente: GEMCO ENERGY, 2020.	54
Figura 15: Pelletizadora de disco. Fuente: www.maquimetal.pe, 2019.	54
Figura 16: Pelletizadora de hilo. Fuente: Leader Extrusion Machinery, 2019.....	55
Figura 17: Proceso de pelletización. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 18: Producción industrial de pellet. Fuente: www.arquitecturayempresa.es., 2015. 58	
Figura 19: Proceso de fabricación. Fuente: Alakangas - Paju, 2002.....	58
Figura 20: Esquema conceptual de la máquina pelletizadora convencional. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 21: Rodillo de compactación. Fuente: es.aliexpress.com, 2020.	60
Figura 22: Matriz anular. Fuente: Portero Jijón, 2014.	63
Figura 23: Matriz plana. Fuente: Flórez, Ramírez, Varela, 2010.....	63
Figura 24: Cuchillas de corte. Fuente: es.dhgate.com, 2020.....	64
Figura 25: Reductor sinfín corona. Fuente: www.erhsa.com, 2020.	65
Figura 26: Funcionamiento motor trifásico. Fuente: Tapia Ramírez, 2019	66
Figura 27: Tolva de flujo de masa. Fuente: Perry, Green, Maloney, 1992.	67
Figura 28: Tipos de tolvas de flujo de masa. Fuente: Perry, Green, Maloney, 1992.	69
Figura 29: Tolva tipo cónica. Fuente: spanish.alibaba.com, 2020.	69
Figura 30: Esquema conceptual de la máquina pelletizadora hidráulica. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 31: Motor hidráulico. Fuente: EATON, 2013.....	71
Figura 32: Bomba hidráulica. Fuente: EATON, 2014.....	71
Figura 33: Motor eléctrico. Fuente: www.fametal.com, 2020.	72
Figura 34: Condición de fuerzas en la formación del pellet. Fuente: Alakangas - Paju, 2002.	77

Figura 35: Laminación en el proceso de compresión del aserrín. Fuente: KALPAKJIAN - SCHMID, 2008.....	80
Figura 36: Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies del material. Fuente: KALPAKJIAN - SCHMID, 2008.	84
Figura 37: Posición de fuerza máxima del rodillo (a). Fuente: KALPAKJIAN - SCHMID, 2008.	85
Figura 38: Dimensiones cuchillas de corte. Fuente: PILANA TOOLS, 2006.	95
Figura 39: Poleas y correas. Fuente: González Viñas, 2020.	97
Figura 40: Mecanismo de transmisión con eje motriz y eje conducido. Fuente: González Viñas, 2020.	97
Figura 41: Dimensiones principales correa con perfil tipo C. Fuente: DUNLOP, 2017....	112
Figura 42: Elección de poleas en base a especificaciones técnicas. Fuente: INTERMEC S.A., 2013.	113
Figura 43: Diagrama de cuerpo libre (DCL) del eje principal. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 44: Sección 1. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 45: Sección 2. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 46: Diagrama de fuerza cortante máxima. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 47: Diagrama de momento flector máximo. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 48: Elección del rodamiento inferior. Fuente: SKF, 2015.	123
Figura 49: Elección del rodamiento superior. Fuente: SKF, 2015.	127
Figura 50: Chaveta paralela, norma S/DIN-6.885/1. Fuente: ocw.unican.es, 2020.	131
Figura 51: Diagrama de cuerpo libre (DCL) del eje porta rodillos. Fuente: Elaboración propia.	138
Figura 52: Elección del rodamiento para el eje porta rodillos. Fuente: SKF, 2015.	143
Figura 53: Curvas de disparo en magnetotérmico. Fuente: www.tuveras.com, 2020.	152
Figura 54: Medidas de diámetros en la tolva de alimentación. Fuente: Elaboración propia.	158
Figura 55: Ángulos de inclinación y de descarga en la tolva de alimentación. Fuente: Elaboración propia.....	161
Figura 56: Dimensiones relevantes de la tolva cónica. Fuente: Jenike and Johanson Chile S.A., 2001.	161
Figura 57: Circuito oleohidráulico. Fuente: Elaboración propia.	165
Figura 58: Designación filtro de retorno. Fuente: STAUFF, 2018b.	181
Figura 59: Clave de pedido manómetro. Fuente: STAUFF, 2018a.....	189
Figura 60: Dimensionamiento de tamaño de la empresa. Fuente: Elaboración propia.	191
Figura 61: Máquina pelletizadora convencional, componentes internos. Fuente: Elaboración propia.	210
Figura 62: Modelo 3D del conjunto completo. Fuente: Elaboración propia.	212

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Potencia calorífica v/s Humedad relativa del aserrín. Fuente: CORREA AGUILERA, 2016.....	14
Gráfico 2: Comparación entre los costes de los combustibles vegetales y de los combustibles fósiles. Fuente: CECU, 2015.....	16
Gráfico 3: Evolución de la producción de pellets en los 10 primeros productores europeos (en toneladas). Fuente: Gauthier, 2019.....	36
Gráfico 4: Evolución del consumo europeo de pellets para uso residencial (< 50 kW) y comercial (> 50 kW) de calor con exclusión de cogeneración (en toneladas). Fuente: Gauthier, 2019.....	36
Gráfico 5: Evolución del mercado del pellet en Chile. Fuente: Segura, 2013.....	38
Gráfico 6: Gráfica comparativa de los costos de la energía en Chile. Fuente: Segura, 2013.....	39
Gráfico 7: Relación entre resistencia y humedad durante la formación de aglomerados. Fuente: Elaboración propia.....	43
Gráfico 8: Elección de la sección de las correas clásicas. Fuente: REXON de Colombia S.A., 2005.....	99
Gráfico 9: Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70 °C, para rodamiento inferior. Fuente: SKF, 2015.....	126
Gráfico 10: Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70 °C, para rodamiento superior. Fuente: SKF, 2015.....	130
Gráfico 11: Intervalos de relubricación a temperaturas de funcionamiento de 70 °C, para rod. porta rodillos. Fuente: SKF, 2015.....	145
Gráfico 12: Rendimiento volumétrico del motor hidráulico. Fuente: EATON, 2013.....	167
Gráfico 13: Rango aplicable del modelo ME175. Fuente: EATON, 2013.....	168
Gráfico 14: Rendimientos volumétrico y total. Fuente: EATON, 2014.....	176
Gráfico 15: Pérdida de presión en la carcasa del filtro. Fuente: STAUFF, 2018b.....	179
Gráfico 16: Pérdida de presión en el elemento filtrante. Fuente: STAUFF, 2018b.....	180
Gráfico 17: Caída de presión relacionada con el caudal. Fuente: ARGO-HYTOS, 2019.....	186
Gráfico 18: Rango de aplicación o admisible de la válvula limitadora de presión. Fuente: HYDAC INTERNATIONAL, 2012.....	187
Gráfico 19: Validación de condiciones en función de curvas de presión. Fuente: HYDAC INTERNATIONAL, 2012.....	188

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Poderes caloríficos y costes indicativos de los combustibles fósiles y de la biomasa. Fuente: CECU, 2015.	17
Tabla 2: Especificaciones técnicas de los pellets y briquetas de madera, con o sin corteza. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.	18
Tabla 3: Tres clases de pellets y sus propiedades. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.....	19
Tabla 4: DIN 51.731. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.....	20
Tabla 5: DIN Plus Pellet. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.....	21
Tabla 6: Categorías en función del origen (pellets de biomasa). Fuente: Fundación CARTIF, 2006.	22
Tabla 7: Características físicas. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.	30
Tabla 8: Características químicas. Fuente: Fundación CARTIF, 2006.....	31
Tabla 9: Clases E, K y P. Fuente: Camps Michelena - Marcos Martín, 2008.....	32
Tabla 10: Clases de calidad finales (C). Fuente: Camps Michelena - Marcos Martín, 2008.	33
Tabla 11: Producción de pellet en UE (en millones de toneladas métricas). Fuente: Segura, 2013.	34
Tabla 12: Procesos mecánicos y conceptos de aglomeración. Fuente: Elaboración propia.	44
Tabla 13: Clasificación de matrices según índice de compresión (función del espesor). Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 14: Tabla de comparación de ambos flujos. Fuente: Elaboración propia.....	67
Tabla 15: Esfuerzo de fluencia promedio de deformación de distintos materiales. Fuente: Fiestas Querebalú - Vargas Herrera, 2018	79
Tabla 16: Elección de las cuchillas de corte. Fuente: PILANA TOOLS, 2006.	96
Tabla 17: Elección del factor de servicio. Fuente: REXON de Colombia S.A., 2005.	98
Tabla 18: Elección del diámetro mínimo de la polea motriz. Fuente: INTERMEC S.A., 2013.	100
Tabla 19: Diámetros mínimo de poleas según norma BS 3.790. Fuente: www.ingemecanica.com, 2020.....	101
Tabla 20: Distancia válida entre ejes de poleas. Fuente: www.ingemecanica.com, 2020.	104
Tabla 21: Elección longitud primitiva nominal para el perfil tipo C. Fuente: DUNLOP, 2017.	105
Tabla 22: Elección del factor de corrección en función de la longitud de la correa. Fuente: DUNLOP, 2017.	105
Tabla 23: Elección del factor de corrección en función del arco de contacto. Fuente: DUNLOP, 2017.	106
Tabla 24: Elección de la prestación base. Fuente: DUNLOP, 2017.	108
Tabla 25: Elección de la prestación adicional. Fuente: DUNLOP, 2017.	108
Tabla 26: Elección de la potencia transmitida por cada correa. Fuente: REXON de Colombia S.A., 2005.	111
Tabla 27: Resumen de valores para fuerza cortante y para momento flector. Fuente: Elaboración propia.....	117

Tabla 28: Elección del factor de seguridad, valor mínimo recomendado. Fuente: Vanegas Useche, 2018.	119
Tabla 29: Propiedades mecánicas del acero AISI 1020. Fuente: Carvajal Niño, 2016.....	119
Tabla 30: Extracto de factores de los rodamientos y límites recomendados para el factor de velocidad A, rodillos cónicos. Fuente: SKF, 2015.....	125
Tabla 31: Extracto de factores de los rodamientos y límites recomendados para el factor de velocidad A, rígidos de bolas. Fuente: SKF, 2015.....	129
Tabla 32: Elección del rango para las dimensiones de la chaveta, en función del diámetro de 55,133 mm. Fuente: JyM Soldevilla, 2008.....	132
Tabla 33: Selección de la chaveta para la transmisión del eje principal. Fuente: OPAC COMPONENTS, 2019.....	135
Tabla 34: Elección de la chaveta para las cuchillas. Fuente: OPAC COMPONENTS, 2019.	137
Tabla 35: Elección del rango para las dimensiones de la chaveta, en función del diámetro de 45 mm. Fuente: JyM Soldevilla, 2008.....	146
Tabla 36: Elección de la chaveta para el cabezal porta rodillos. Fuente: OPAC COMPONENTS, 2019.....	149
Tabla 37: Selección del motor eléctrico. Fuente: ABB, 2008.....	150
Tabla 38: Elección del disyuntor magnetotérmico. Fuente: LEGRAND, 2020.....	152
Tabla 39: Elección del protector diferencial. Fuente: LEGRAND, 2020.....	153
Tabla 40: Elección del relé térmico. Fuente: LEGRAND, 2017.....	154
Tabla 41: Elección del conductor. Fuente: General Cable, 2014.....	155
Tabla 42: Elección VDF Micromaster 440. Fuente: SIEMENS, 2017.....	156
Tabla 43: Programación básica del VDF de la máquina pelletizadora convencional. Fuente: SIEMENS, 2002.....	157
Tabla 44: Especificaciones técnicas motor hidráulico, modelo ME175. Fuente: EATON, 2013.....	166
Tabla 45: Características típicas del aceite hidráulico SAE 10W. Fuente: Mobil, 2020. ..	171
Tabla 46: Especificaciones técnicas modelo PVM081, parte uno. Fuente: EATON, 2014.	175
Tabla 47: Especificaciones técnicas modelo PVM081, parte dos. Fuente: EATON, 2014.	176
Tabla 48: Grados de pureza recomendados para aplicaciones hidráulicas. Fuente: STAUFF, 2018b.....	178
Tabla 49: Selección tubería de aspiración. Fuente: HANSA-FLEX, 2011.....	182
Tabla 50: Selección tubería de impulsión y retorno. Fuente: HANSA-FLEX, 2011.....	183
Tabla 51: Selección del racor de ángulo en 90°. Fuente: HANSA-FLEX, 2011.....	184
Tabla 52: Selección del racor en T. Fuente: HANSA-FLEX, 2011.....	185
Tabla 53: Matriz multicriterio para la localización de la empresa. Fuente: Elaboración propia.	192
Tabla 54: Costo energético máquina pelletizadora convencional. Fuente: Elaboración propia.	195

Tabla 55: Costo energético máquina pelletizadora hidráulica. Fuente: Elaboración propia.	195
Tabla 56: Costo de la materia prima. Fuente: Elaboración propia.	196
Tabla 57: Costo por operador de la máquina. Fuente: Elaboración propia.	197
Tabla 58: Costos asociados a mantención preventiva, máquina convencional. Fuente: Elaboración propia.....	199
Tabla 59: Costos asociados a mantención preventiva, máquina hidráulica. Fuente: Elaboración propia.....	200
Tabla 60: Mejor elección por costo, según método del CAUE. Fuente: Elaboración propia.	201